

Végéphy – 24^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES ADVENTICES
ORLÉANS – 3, 4 et 5 DÉCEMBRE 2019

PEUT-ON RÉDUIRE LES HERBICIDES SANS PERDRE DU RENDEMENT ?

N. COLBACH ET S. CORDEAU

Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté,
F-21000 Dijon, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inra.fr

RÉSUMÉ

Afin de concevoir des systèmes agricoles durables et économes en herbicides, il est indispensable de comprendre les relations entre usage d'herbicides, niveau d'infestation par les adventices et pertes de rendement. Comme les agriculteurs raisonnent l'utilisation des herbicides en fonction de la flore et de leurs autres pratiques (ex. travail du sol, date de semis, rotation), il est difficile d'évaluer ces relations directement en parcelles agricoles, tant les possibilités sont nombreuses. Notre étude a donc choisi de traiter la question via l'utilisation d'un modèle de simulation. Nous avons collecté et simulé 272 systèmes de culture d'agriculteurs de sept régions avec la flore adventice typique de ces régions, puis sans aucune adventice, et enfin sans l'usage d'herbicides (et ce sans changer les autres pratiques). Les résultats montrent que (1) la perte de rendement augmente avec la biomasse adventice, (2) il n'y a pas de corrélation entre IFT herbicide d'une part, biomasse adventice et perte de rendement d'autre part (3) parce que les agriculteurs compensent la réduction herbicide par des pratiques alternatives ou complémentaires, (4) la perte de rendement liée aux adventices augmente lorsqu'on supprime les herbicides dans les systèmes sans aucune autre modification, (5) les effets sont plus marqués à l'échelle pluriannuelle qu'à l'échelle annuelle.

Mots-clé : perte de rendement, IFT herbicide, adventice, simulation, nuisibilité

ABSTRACT

CAN HERBICIDE USE BE REDUCED WITHOUT INCREASING YIELD LOSS DUE TO WEEDS?

In order to design sustainable herbicide-scarce cropping systems, we need to understand the relationship between herbicide use, weed infestation and yield loss. Because farmers reason herbicide use depending on weeds and their other practices (e.g. tillage, sowing date, rotation), the range of possibilities is enormous and it is difficult to assess these relationships directly in farmers' fields. We therefore chose to investigate the issue using a simulation model. We collected 272 cropping systems from farmers, crop advisors etc in seven regions, first simulated them with the typical weed flora of these regions, then without weeds, and finally without herbicides (and without changing any other practice). The results showed that (1) yield loss increased with weed biomass, (2) herbicide treatment frequency index was not correlated to either weed biomass or yield loss (3) because farmers compensated herbicide reduction by alternative or complementary practices, (4) weed-caused yield loss increased when herbicides were suppressed without any other modification, (5) effects were more visible at the multiannual (rotation) scale than at the annual scale.

Keywords : yield loss, HTFI, herbicide, weed, simulation, nuisance

1 INTRODUCTION

Le secteur agricole doit réduire l'utilisation de pesticides, et particulièrement d'herbicides, pour des raisons sociétales, économiques, environnementales et de santé. Ceci soulève la question de savoir si la production agricole sera affectée par les adventices qui sont considérées comme les biogresseurs les plus nuisibles à la production agricole lorsqu'elles ne sont pas contrôlées (Oerke, 2006). Cependant, cette conclusion repose principalement sur des expériences comparant le rendement annuel des cultures dans des champs avec différentes densités d'adventices (Cousens, 1985; Song et al., 2017), souvent d'une seule espèce et d'une seule cohorte d'émergence homogène (Milberg and Hallgren, 2004). Mais, les champs sont généralement infestés par de nombreuses espèces adventices contrastées (Fried et al., 2008), avec des cohortes d'émergence successives (Cordeau et al., 2017). À ce jour, peu d'études ont tenté d'étudier la nuisibilité des adventices à l'échelle de la communauté (Berti and Zanin, 1994; Swinton et al., 1994; Florez et al., 1999).

Ces études se limitent souvent aux pertes de rendement d'une année. Cependant, les agriculteurs sont contraints d'assurer un contrôle de la nuisibilité des années à venir (Macé et al., 2007), car une année donnée leur production n'est généralement pas affectée par les quelques plantes passant au travers de leur programme de désherbage, mais par la perte de rendement à plus long terme due aux centaines voire milliers de semences qu'une seule plante peut produire et qui lèveront les années suivantes (Buhler et al., 1997).

La question qui se pose est de savoir dans quelle mesure les adventices ont un impact sur la production agricole dans les champs et les systèmes de culture des agriculteurs, et dans quelle mesure les herbicides sont nécessaires ou échangeables pour assurer la production. Des études antérieures avaient tenté de répondre à cette question en corrélant les adventices et les rendements mesurés dans diverses parcelles conduites avec des herbicides (O'Donovan et al., 2005; Gianessi and Reigner, 2007). Cette approche présente l'avantage d'évaluer les effets de flores adventices réelles dans des conditions pédoclimatiques et des situations de production variées. Mais ces études ne permettent généralement qu'une "photo" annuelle, ne tenant pas compte des impacts à long terme des adventices et ne permettant pas de démêler l'effet direct des systèmes de culture sur le rendement de leur impact indirect via leur effet sur les adventices (Quinio et al., 2017). En outre, les agriculteurs adaptent leurs pratiques à la flore adventice qu'ils observent dans leurs champs (Wilson et al., 2008), ce qui rend difficile la distinction entre l'effet des systèmes de culture sur les adventices de celui de la perception des adventices par les agriculteurs sur leurs pratiques. De plus, les systèmes de culture sont une suite logique et ordonnée de techniques culturales optimisées en fonction des objectifs et des contraintes des agriculteurs (Boiffin, 2001). En conséquence, l'intensité d'utilisation des herbicides dans un champ dépend des autres pratiques (Clarence and Stephan, 1991), ce qui rend difficile la distinction entre l'effet des herbicides sur les adventices des effets de ces autres pratiques. Les essais désherbage (testant des programmes herbicides) contournent ce problème en comparant les flores de adventices dans des zones traitées et non traitées d'un même champ (Cordeau et al., 2016), mais ils n'évaluent généralement les effets sur les adventices que quelques semaines après les traitements. Peu d'entre eux prennent en compte les effets sur la production agricole (Milberg and Hallgren, 2004; Soltani et al., 2016), et ce uniquement avec des données annuelles centrées sur une culture, en négligeant tous les impacts à long terme.

Pour surmonter ces problèmes méthodologiques, nous proposons de simuler des vrais systèmes de culture enquêtés auprès d'agriculteurs à l'aide d'un modèle, FLORSys, afin (1) de quantifier l'impact de communautés adventices réalistes sur la production à l'échelle annuelle et pluriannuelle dans une gamme de pédoclimats et de systèmes de culture contrastés, (2) analyser le lien entre l'intensité d'usage des herbicides et les autres pratiques culturales, (3) quantifier l'impact de l'utilisation des herbicides sur les adventices et la production, (4) identifier les combinaisons de pratiques culturales permettant de réduire à la fois l'usage d'herbicides et les pertes de rendement dues aux adventices. Ces systèmes ont été testés avec FLORSYS, un modèle mécaniste afin de reproduire le plus fidèlement possible les conditions réelles sur le terrain (Gardarin et al., 2012; Munier-Jolain et al., 2013, 2014; Colbach et al., 2014a, 2014b; Mézière et al., 2015; Colbach et al., 2017). L'utilisation de ce modèle a

permis de réaliser plusieurs séries de simulations pour dissocier les effets de l'intensité de l'usage des herbicides des autres pratiques culturales ainsi que ceux de l'impact des adventices sur la production des effets des pratiques culturales sur les adventices et la production.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Principe de l'étude

La première étape consistait à collecter des données sur les systèmes de culture dans diverses régions et situations de production. Plusieurs sources ont été utilisées pour inclure (1) les pratiques des agriculteurs passées et actuelles, à partir d'entretiens avec les agriculteurs, de statistiques agricoles et des experts régionaux, (2) des systèmes innovants visant à réduire l'utilisation d'herbicides, basés sur des essais et des propositions de conseillers agricoles et de scientifiques (Colbach and Cordeau, 2018). Toutes les sources de données couvraient un gradient d'utilisation d'herbicide et une diversité de stratégies alternatives.

Au total, 272 systèmes de culture de 6 régions françaises (Bourgogne, Bassin Parisien, Aquitaine, Poitou-Charentes, Lorraine, Picardie) et une espagnole (Catalogne) ont été collectés. Ces systèmes comprennent des systèmes conventionnels et biologiques, avec une intensité de travail du sol allant du labour systématique au semis direct. Les rotations étaient essentiellement basées sur des céréales (blé, orge, maïs) et du colza. Certaines comprennent aussi des légumineuses (luzerne, féverole, pois etc.), des dicotylédones non légumineuses (tournesol, lin etc.) et des prairies temporaires. Ces rotations varient bien évidemment entre les régions de production.

Chaque système a été simulé avec un modèle de champ virtuel qui permettait de simuler la dynamique de la flore adventice multi-spécifiques et multi-cohortes et son impact sur la production en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat, à une échelle quotidienne sur plusieurs années ou décennies (voir section 2.2). Le plan de simulation a été conçu pour discriminer des effets confondants. Chaque système de culture a été testé à deux reprises, avec et sans adventices, afin de distinguer l'impact des adventices sur la production des effets des pratiques culturales. Pour séparer les effets des pratiques culturales sur les adventices de la réciproque, les pratiques n'ont pas été adaptées à la flore adventice simulée au fil du temps. Pour distinguer les effets des herbicides sur les adventices et la production des effets des changements dans les pratiques culturales qui accompagnent généralement les changements dans l'utilisation des herbicides, chaque système a également été simulé avec et sans herbicides (sans autre changement dans les pratiques culturales).

Dans chacune de ces quatre séries (avec adventices et herbicides, sans adventices et avec herbicides, avec adventices et sans herbicides, sans adventices ni herbicides), chaque système de culture était simulé sur 27 ans, répétant le motif rotationnel (ex. colza/blé/orge) au cours du temps, et répété 10 fois avec 10 scénarios climatiques différentes de la région d'origine du système. Les mêmes 10 scénarios ont été utilisés pour tous les systèmes d'une région donnée, permettant d'obtenir un plan expérimental randomisé en blocs.

2.2 Le champ virtuel simulé par FLORSys

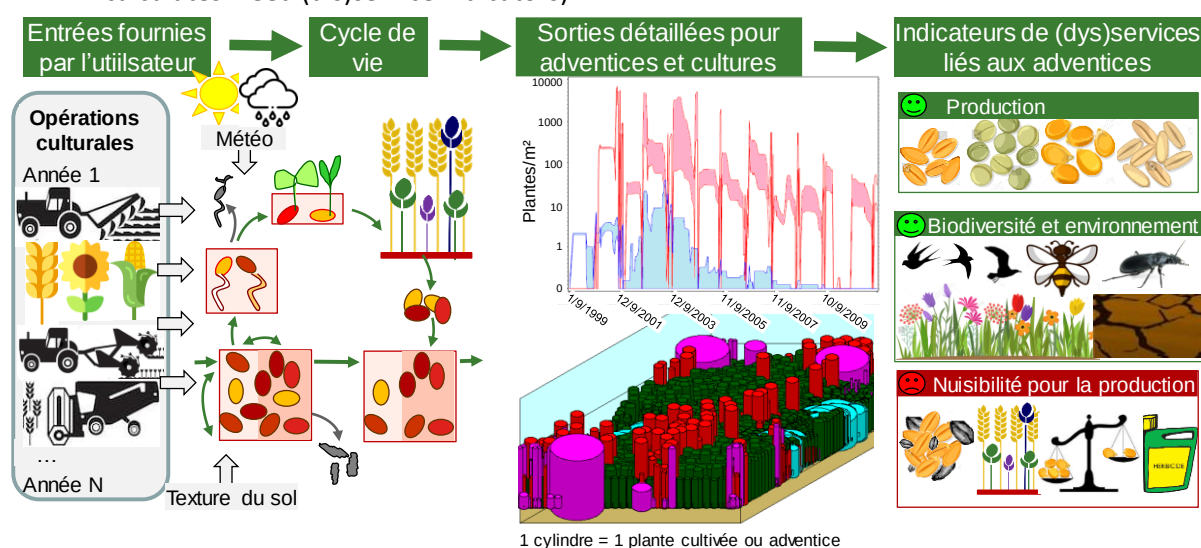
FLORSys (Gardarin *et al.*, 2012; Munier-Jolain *et al.*, 2013, 2014; Colbach *et al.*, 2014a, 2014b; Mézière *et al.*, 2015; Colbach *et al.*, 2017) est une parcelle virtuelle où des systèmes de culture peuvent être testés et évalués en termes de production et de services et dys-services dus aux adventices. L'utilisateur entre une liste d'opérations sur une rotation similaire à l'enregistrement des opérations d'une parcelle d'une station expérimentale ou d'une exploitation agricole, le tout accompagné de la météo journalière et de caractéristiques du sol (Figure 1). Cette liste comprend toutes les opérations (travail du sol, semis, désherbage mécanique, fertilisation, pesticides, fauche, récolte) décrites en détail en termes de dates et options (par exemple pour une opération de semis : date, densité, profondeur, largeur inter-rang, orientation, semoir, espèces et variétés, traitement de semences, impureté dans le lot de semences).

Ces données d'entrées affectent le cycle de vie des cultures et adventices en fonction de différents processus (survie, dormance, germination des semences ; levée, développement, croissance et plasticité morphologique des plantes). Ces processus sont modulés en fonction des techniques culturales, des caractéristiques biologiques de chaque semence ou plante, et de leur environnement

qui dépend lui-même du pédoclimat, des techniques culturales et de la présence de plantes voisines. La version actuelle de FLORSYS ne considère que la compétition plante-plante pour la lumière, celle pour l'azote est en cours d'intégration. Cette représentation détaillée produit des sorties détaillées, au jour le jour et en 3D, permettant de diagnostiquer les performances d'une technique ou d'un système. Pour simplifier la comparaison de différents systèmes de culture, les sorties détaillées sont traduites en indicateurs de (dys)services des adventices (ex. perte de rendement de la culture, offre trophique pour abeilles). Le modèle est actuellement paramétré pour 26 espèces adventices fréquentes et contrastées ainsi que 33 espèces cultivées (de rente et de service) de grandes cultures. La version utilisée ici néglige la résistance aux herbicides.

FLORSYS a été évalué ("validé") à dire d'experts et en comparaison à des observations de terrain d'adventices (densité, biomasse, stock semencier) et de cultures (densité, biomasse, rendement) dans une large gamme de systèmes et de pédoclimats (Colbach *et al.*, 2016). Généralement, le rendement, les stocks semenciers, les densités adventices observés sont correctement prédits et classés en fonction des systèmes de culture et espèces, surtout à l'échelle de la rotation.

Figure 1. Présentation générale du modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS qui simule le développement et la croissance des cultures et adventices à partir du système de culture, la météo et du sol, avec une représentation mécaniste des processus biophysiques au jour le jour et en 3D, puis calcule des indicateurs de (dys)services fournis par les adventices (Nathalie Colbach © 2018). (General representation of the "virtual field" model FLORSYS which simulates the development and growth of crops and weeds from cropping system, weather and soil inputs based on a mechanistic representation of biophysical processes at a daily time step and in 3D, and then calculates weed (dis)service indicators)



2.3 Les analyses statistiques

Trois variables d'état de la flore adventice (densité de plantes, biomasse aérienne, ratio de la biomasse adventice divisée par la biomasse cultivée) ont été extraites pour chaque simulation, et ce à cinq stades-clé (fin de la levée de la culture, un mois plus tard, début de la floraison de la culture, moyenne du semis à la récolte de la culture, valeur maximale pendant cette période). La perte de rendement (%) a été calculée comme $100 \times (\text{rendement des simulations avec adventices} - \text{rendement des simulations sans adventices}) / \text{rendement des simulations sans adventices}$. L'efficacité des herbicides a été évaluée par le ratio $\text{biomasse adventice au début de la floraison des simulations avec herbicides} / \text{biomasse adventice au même stade des simulations sans herbicides}$, en utilisant seulement la première année des simulations pour que la flore avant traitement soit comparable dans les deux séries de simulations.

Pour identifier le meilleur indicateur "enherbement" de la perte de rendement, des régressions non-linéaires ont été ajustées entre cette perte d'une part, les trois variables d'état adventices aux 5

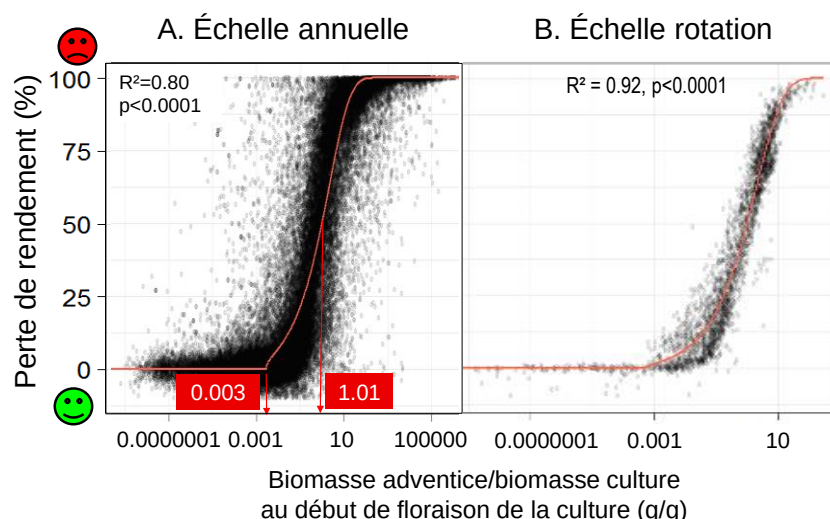
dates d'autre part. Pour identifier les pratiques agricoles déterminant l'intensité d'usage herbicide ou la perte de rendement, des arbres de classification et de régression (CART) ont été établis entre pratiques d'une part, indice de fréquence de traitement herbicide (IFTH¹) ou la perte de rendement d'autre part. Pour analyser l'effet des herbicides sur les adventices et la production, les variables d'état adventices et la perte de rendement des simulations avec et sans herbicides ont été comparées avec des boîtes à moustache.

3 RÉSULTATS

3.1 La perte de rendement est liée à la biomasse adventice et non au nombre de plantes

La comparaison des simulations avec et sans adventices permet de calculer la perte de rendement due à la compétition avec les adventices pour la lumière, dans des conditions exemptes de stress hydrique ou azoté. La perte de rendement annuelle médiane² est de 36% et augmente avec l'enherbement. Le meilleur indicateur "enherbement" de la perte de rendement est le rapport de la biomasse adventice sur la biomasse de la culture au début de la floraison de la culture (Figure 2.A). Lorsque la biomasse adventice dépasse celle de la culture (rapport > 1), la perte de rendement dépasse les 50%. En revanche, aucune corrélation n'a pu être établie entre perte de rendement et densités de plantes d'adventices, alors que c'est cette dernière qui est généralement suivie sur le terrain. Le lien entre densité d'adventices et perte de rendement est bien plus visible à l'échelle pluriannuelle ou de la rotation (Figure 2.B) alors que la nuisibilité des adventices est généralement étudiée par des essais annuels (Cordeau *et al.*, 2016).

Figure 2. Perte de rendement des cultures en fonction du rapport de biomasse adventice sur celle de la culture au début de la floraison de la culture simulées avec FLORSYS sur 272 systèmes de culture de sept régions. A. Échelle annuelle : chaque point est un une année d'une répétition d'un système de culture; B. Échelle rotation: chaque point est la moyenne sur l'ensemble des années simulées d'une répétition d'un système de culture (Nathalie Colbach © 2018). (Crop yield loss as a function of the ratio of weed biomass to crop biomass at the onset of crop flowering si-mulated with FLOR-SYS for 272 cropping systems from 7 regions. A. Annual scale: each point is one year of one repetition of one cropping system; B. Rotation scale: each point is the mean over all simu-lated years of one repetition and one cropping system)



3.2 L'enherbement ne dépend pas de l'IFT herbicide

L'analyse des simulations avec adventices et avec herbicides montre qu'il n'y a pas de relation entre le niveau d'usage herbicide pratiqué d'une part, et le rendement ou la flore adventice d'autre part (Figure

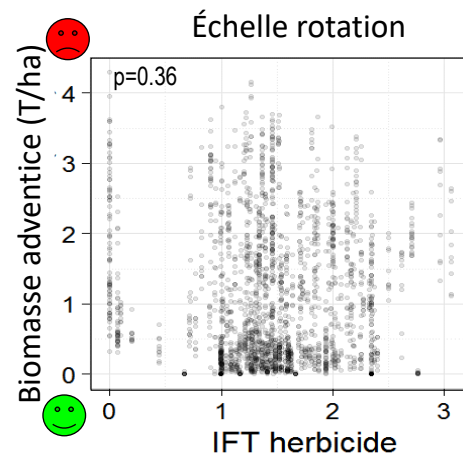
¹ Un IFTH de 1 correspond à l'application d'un herbicide par campagne, à la dose réglementaire sur l'ensemble du champ.

² La médiane est comparable à la moyenne mais est moins sensible aux valeurs extrêmes. Il s'agit de la valeur excédant 50% des valeurs de l'échantillon et plus faible que les autres 50% de l'échantillon.

3). Cette absence de relation est d'autant plus marquante que les herbicides réduisant la biomasse adventice en fin de campagne de plus de 60% dans les simulations avec herbicides comparées aux simulations sans herbicides, et ce en moyenne sur tous les traitements, espèces adventices considérées, systèmes de culture, années de rotation et séries climatiques.

Pour évaluer l'impact des herbicides, il faut comparer l'enherbement et le rendement entre les simulations avec et sans application d'herbicides. En moyenne, la suppression des herbicides sans autre changement de pratiques augmentait la perte de rendement due aux adventices de 20% à l'échelle de la rotation. Cependant, les herbicides ne sont pas la seule technique culturale dont la suppression perturbe profondément le système. Si, au lieu des herbicides, on supprime le travail du sol sans reconcevoir le système de culture, la perte de rendement augmente encore plus, en moyenne de plus de 40%. Cela démontre à quel point il n'est pas possible d'interpréter l'usage d'herbicide (IFTH) sans tenir compte des autres pratiques, et que la réduction (ou le retrait complet) de pratiques-clé de gestion des adventices, comme les herbicides ou le travail du sol, doit être compensé par des pratiques alternatives, sous peine d'augmenter les pertes de rendement.

Figure 3. L'enherbement des parcelles n'est pas lié à l'intensité d'usage des herbicides. Biomasse adventice en culture (moyenne du semis à la récolte) et Indice de Fréquence de Traitement (IFT) herbicide moyens de chaque système de culture x répétition climatique simulés avec FLORSYS sur 272 systèmes de culture de sept régions. (Nathalie Colbach © 2018).
(Weed infestation in fields is not correlated to the intensity of herbicide use. Mean weed biomass in crops (mean from sowing to harvest) and herbicide Treatment Frequency Index (TFI) for each cropping system x weather repetition simulated with FLORSYS for 272 cropping systems of 7 regions)



3.3 Les agriculteurs compensent la réduction des herbicides par des alternatives non chimiques

L'absence de lien entre enherbement et IFT herbicide n'est pas surprenant parce que les agriculteurs prennent des mesures compensatoires lorsqu'ils réduisent l'usage d'herbicides (Figure 4). Par exemple, l'usage d'herbicides est plus faible dans les systèmes incluant un travail du sol entre octobre et mars (et donc aussi une culture de printemps ou une culture d'hiver semée tardivement) au moins un an sur trois (IFTH annuel moyen=1.3) que dans les systèmes où le sol est rarement travaillé en hiver (IFTH = 2.1). La fréquence de désherbage mécanique est également cruciale, faisant varier l'IFTH de 0.2 dans les systèmes avec plus de 0.7 opérations de désherbage mécanique par an (moyenne sur la rotation), à un IFTH de 1.3 dans les systèmes avec un désherbage mécanique plus rare. On remarque que dans certaines situations (tableau à l'intérieur de la Figure 4), les agriculteurs ont tendance à "sur-assurer" par rapport aux expérimentateurs, conseillers et chercheurs, appliquant entre une demie et une dose entière d'herbicides de plus par an.

3.4 Des stratégies pour concilier contrôle de l'enherbement et faible IFT herbicide

Enfin, nous avons analysé les déterminants de la perte de rendement avec la même technique que celle de la Figure 4, puis ceux présentant simultanément la plus faible perte de rendement liée aux adventices et le plus faible niveau d'usage herbicides (Tableau I). Les trois meilleures stratégies sont basées sur des approches très différentes. La première rassemble les monocultures de maïs, avec du travail du sol superficiel à la fois entre avril (avant le semis) et septembre (tout de suite après récolte) et entre octobre et mars, sans labour ou avec labour au plus un an sur deux. Le premier travail est

retardé d'au moins trois semaines par rapport à la récolte du précédent. S'il y a des passages de rouleau, ils sont espacés à la fois de la récolte du précédent et du semis du suivant. Le programme herbicide est similaire d'une année à l'autre, avec plusieurs produits appliqués par an à dose réduite, privilégiant les produits systémiques et évitant les produits racinaires. Les doses réduites constituent un risque majeur de développement de résistance aux herbicides à long-terme, qui a été ici amoindri par le mélange de produits et un programme de plusieurs passages de désherbage mécanique, mais pas nécessairement tous les ans ou en fréquence variable d'une année à l'autre.

Figure 4. Déterminants non-chimiques du niveau d'usage herbicide parmi les pratiques agricoles collectées dans 7 régions. Les branches de cet arbre montrent des combinaisons de pratiques culturales, les feuilles indiquent l'IFT herbicide annuel moyen des systèmes de culture correspondants. Chaque nœud sépare une branche en deux options, dont une qui augmente l'IFT (vers la droite) et l'autre qui le diminue (vers la gauche). (Non-chemical cropping practices driving herbicide use intensity in the cropping systems collected in 7 regions. The tree branches show combinations of cropping practices, the leaves show the mean annual herbicide TFI of the corresponding cropping systems. Each node splits a branch into two options, with one increasing TFI (toward the right) and one decreasing it (to the left)) (Nathalie Colbach © 2018)

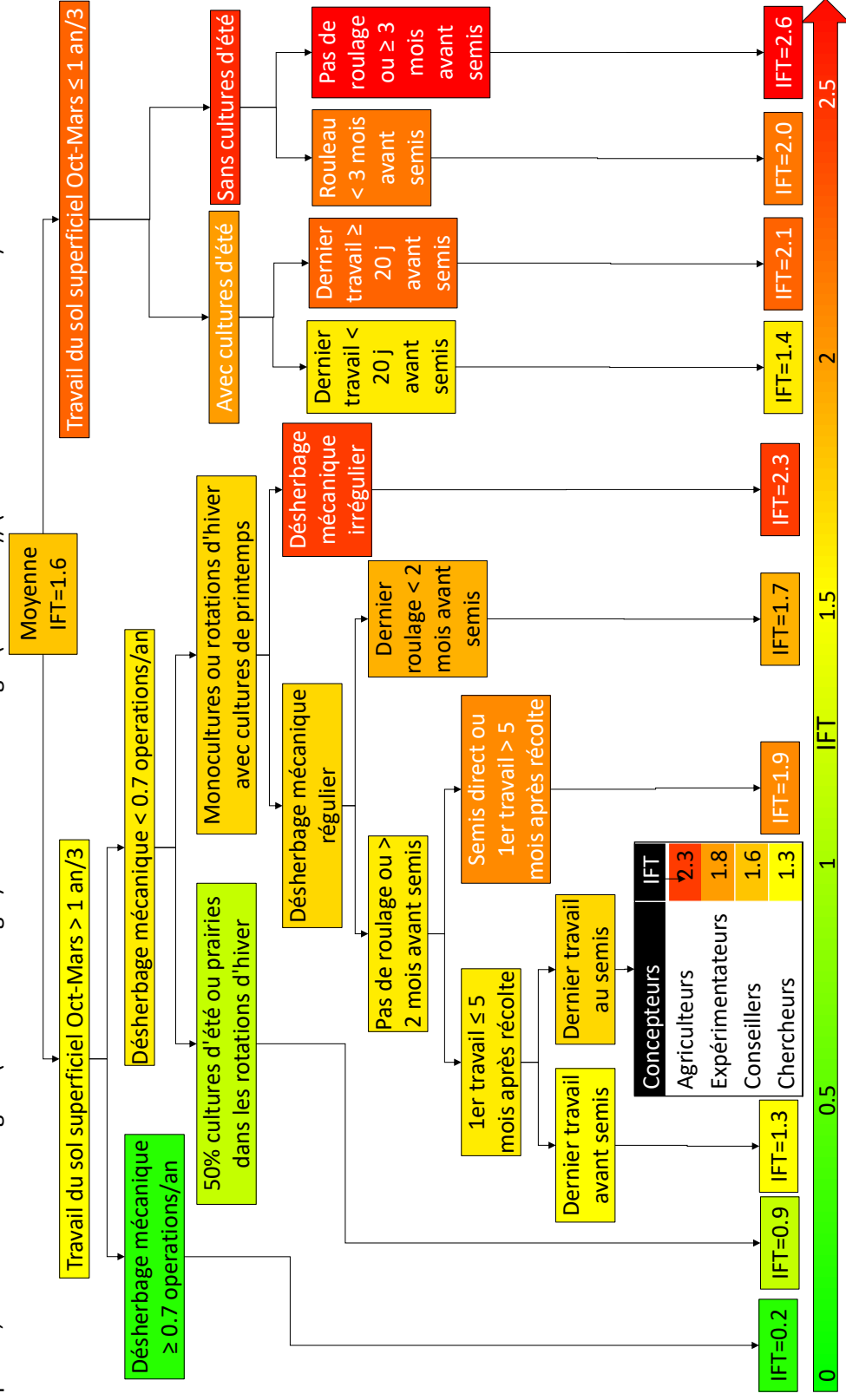


Tableau I: Typologie de systèmes de culture d'agriculteurs en fonction de leur performance en termes de réduction de la perte de rendement due aux adventices et de réduction du niveau d'usage herbicides. Les trois meilleurs et les trois pires types identifiés parmi les 272 systèmes de culture évalués à partir des performances simulées à l'aide de FLORSYS. Les cases blanches signifient qu'il n'y a pas de point commun entre systèmes de la stratégie pour la technique en question.

(Typology of farmers' cropping systems from their performance in terms of yield loss and herbicide use. The three best and the three worst types identified among 272 cropping systems based on their performance simulated with FLORSYS. Empty cells indicate that the systems of the given strategy have nothing in common for the given technique.)

		Les 3 meilleures stratégies			Les 3 pires stratégies		
Perte de rendement		< 10%	< 20%	< 20%	> 40%	> 40%	> 40%
IFT herbicide		et	et	et	ou	ou	ou
Risque d'échec [§]		< 0.8	< 0.8	< 1.2	> 1.6	> 1.6	> 1.6
		0%	0%	0%	83%	85%	89%
Rotation	% cultures d'hiver	0%	25-75%	15%-64%	> 11%		
	% cultures de printemps	100%	25-75%	> 36%	< 88%		
	% prairies temporaires	0%	< 20%	> 20%	< 20%	< 20%	< 20%
	Nb cultures et variétés	1	> 4		> 1		
	Durée de la couverture (/an)	< 6 mois	> 8.3 mois	< 8 mois			
Semis des cultures de	Hiver				> 12 sept		
	Printemps				> 4 avril		
Variabilité dans les dates de récolte					> 25j	> 25j	< 25 jour
Récolte des cultures de printemps		> 19 oct			> 14 août		
Travail du sol	Opérations superficielles/an	< 3.4	> 3.4	> 3.4	< 3.4		
	En été/an (avril-sept)	< 2.4	> 2.4	> 2	< 2.4		
	1er travail (depuis récolte)	> 24 jours	< 24 jours		> 24 jours		
	Dernier travail (avant semis)				> 1 jour		
	Profondeur moyenne	< 12 cm	< 12 cm		< 12 cm	> 12 cm	
	Profondeur maximale	12-21 cm	< 21 cm		< 21 cm	> 23 cm	
	Fréquence de labour	< 1 an/2	< 1 an/2		< 1 an/2	> 1 an/2	
	Labour (depuis récolte)						> 18 jours
	Labour (avant semis)			> 2 mois			> 9 jours
	Labour oct-mars		> 1 an/5	> 1 an/3			
Date du roulage	Depuis la récolte	> 2 mois	> 2 mois	< 2 mois	> 2 mois	> 2 mois	> 2 mois
	Jusqu'au semis	> 1.5 mois	> 1.5 mois	< 1.5 mois	> 1.5 mois	> 1.5 mois	> 1.5 mois
Herbicides	1er (depuis semis)	< 5 mois	< 5 mois		1.5-5 mois	< 4.5 mois	< 4.5 mois
	Dose (% dose pleine)	31-58%	< 58%		< 58%	< 58%	> 58%
	Nombre par an	1.3-3	1.3-2.1		3.8-4.7	> 4.7	1.3-3.8
	Variable entre années	non	oui		oui	beaucoup	oui
	% Systémiques	> 82%	< 82%	< 83%	> 82%		
	Racinaire ³	< 12%	< 12%		< 12%	> 12%	
	Pseudo-racinaire				~ 0%		
Désherbage mécanique	Nombre/an	0.25-1.6	0.25-1.6		0.25-1.6	0.25-1.6	< 0.25
	Variable entre années	oui	oui		oui	oui	Peu ou non
	Dernier (avant récolte)						> 4.5 mois

[§] Échec = perte de rendement > 40% ou IFT > 1.6 en moyenne sur la rotation

³ Les herbicides foliaires pénètrent dans la plante via les parties émergées et ne détruisent que des plantes levées au jour du traitement. Les herbicides racinaires pénètrent via les racines ; ils persistent pendant plusieurs jours voire semaines et détruisent les plantes (levées ou non) dont les racines se situent dans les horizons superficiels du sol. Les herbicides pseudo-racinaires sont également persistants ; ils sont étalés à la surface du sol et détruisent les adventices lors de leur levée.

La deuxième stratégie est basée sur les rotations diversifiées dans le temps (avec des rotations de 4 ans ou plus) et/ou dans l'espace (avec des mélanges de cultures ou des cultures de couverture), combinant à la fois cultures de printemps et cultures d'hiver. Il s'agit soit de cultures d'hiver très longues (ex. colza), soit de cultures d'hiver plus courtes ou de cultures de printemps précédées de couverts intermédiaires. La récolte est suivie rapidement du premier travail du sol, avec des opérations fréquentes, notamment en été. La stratégie de roulage est identique à celle de la première stratégie. Les systèmes comprennent toujours du labour, notamment en hiver, mais au plus un an sur deux. Le programme chimique est simplifié par rapport à la première stratégie et variable entre années, lié à la rotation diversifiée, et évitant les passages de printemps en cultures d'hiver. Le désherbage mécanique est similaire à celui de la première stratégie.

La troisième stratégie, avec une rotation également très diversifiée, inclue aussi des prairies temporaires. Il y a peu de cultures de couverture, laissant place à des intercultures nues plus longues et un travail du sol très fréquent, notamment en été. Les systèmes sont tous labourés au moins un an sur trois en hiver, et ce au moins deux mois avant le semis. Il y a toujours du rouleau, aussi bien après récolte qu'avant semis. Aucun point commun entre les différents systèmes de culture utilisant cette stratégie n'a pu être identifié pour les programmes herbicides ou désherbage mécanique.

S'il a été possible d'identifier des stratégies gagnantes (réduisant simultanément la perte de rendement et le niveau d'usage herbicides) et des stratégies perdantes (augmentant la perte de rendement ou l'usage d'herbicides), celles-ci ne sont pas adaptables à toutes les régions et il n'a pas été possible d'identifier une ou quelques pratiques permettant de discriminer les deux types de stratégies. Par exemple, tout comme les stratégies gagnantes, les perdantes comprennent aussi bien des systèmes labourés et rarement labourés, des traitements herbicides fréquents ou plus rares, des doses herbicides réduites ou pleines. Ceci démontre de nouveau que ce n'est pas un seul choix technique qui détermine le succès ou l'échec d'un système, mais la combinaison judicieuse de toutes les composantes du système.

4 DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette analyse des pratiques agricoles de plusieurs régions contrastées sur la base du modèle FLORSys a permis de déterminer qu'il est possible de concilier production agricole et faible usage herbicide, et ce en mettant en œuvre différents types de combinaisons de pratiques agricoles. Ce dernier point est crucial pour que les agriculteurs puissent choisir la ou les stratégies les plus adaptées aux objectifs et contraintes de leur exploitation. La liste des stratégies identifiées ici n'est pas exhaustive. Elle est d'ailleurs basée sur la seule analyse des conséquences de la flore adventice, négligeant d'autres facteurs biotiques et abiotiques. Il est donc nécessaire de poursuivre ce travail d'analyse des possibles, en explorant une plus grande gamme de pratiques agricoles, en cherchant spécifiquement les solutions permettant de concilier production agricole, faible niveau d'usage herbicides et conservation de la biodiversité. Il s'agit de réaliser des évaluations multi-critères incluant les trois aspects de la durabilité en étudiant notamment la rentabilité économique des différents systèmes. Enfin, la robustesse de ces stratégies face au changement climatique doit être étudiée. Les types de stratégies identifiées ici (gagnantes ou perdantes) doivent aussi être testées dans la pratique afin de vérifier que les résultats de la modélisation traduisent bien les observations faites sur le terrain.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le soutien financier de l'INRA et le projet ANR CoSAC (ANR-14-CE18-0007).

6 BIBLIOGRAPHIE

- Berti A., Zanin G. (1994) Density equivalent: a method for forecasting yield loss caused by mixed weed populations. *Weed Research* 34, 327-332
- Boiffin J., Malezieux, E, Picard, D (2001) Cropping systems for the future. In: H. G. J. Nösberger, PC. Struik, editor., *Hambourg*, 261-279
- Buhler D. D., Hartzler R. G., Forcella F. (1997) Implications of weed seedbank dynamics to weed management. *Weed Science*, 329-336

- Clarence J., Stephan F. (1991) Integrated weed management: the rationale and approach. *Weed Technology* 5, 657-663
- Colbach N., Busset H., Roger-Estrade J., Caneill J. (2014a) Predictive modelling of weed seed movement in response to superficial tillage tools. *Soil & Tillage Research* 138, 1-8
- Colbach N., Collard A., Guyot S. H. M., Mézière D., Munier-Jolain N. M. (2014b) Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *European Journal of Agronomy* 53, 74-89
- Colbach N., Fernier A., Le Corre V., Messéan A., Darmency H. (2017) Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. I. Effects on weeds. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 11582-11600
- Colbach N., Cordeau S. (2018) Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* 94, 67-78
- Cordeau S., Dessaint F., Denieul C., Bonin L., Vuillemin F., Delattre M., Rodriguez A., Guillemin J. P., Chauvel B. (2016) La nuisibilité direct des adventices en grandes cultures : quelles réponses nous apportent les essais désherbage ? In: AFPP, editor. 23e Conférence du COLUMA - journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, DIJON, 6, 7 et 8 décembre 2016;
- Cordeau S., Smith R. G., Gallandt E. R., Brown B., Salon P., DiTommaso A., Ryan M. R. (2017) Timing of tillage as a driver of weed communities. *Weed Science* 65, 504-514
- Cousens R. (1985) A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology* 107, 239-252
- Florez J. A., Fischer A. J., Ramirez H., Duque M. C. (1999) Predicting rice yield losses caused by multispecies weed competition. *Agronomy Journal* 91, 87-92
- Fried G., Norton L. R., Reboud X. (2008) Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128, 68-76
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N. (2012) Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecological Modelling* 240, 123-138
- Gianessi L. P., Reigner N. P. (2007) The value of herbicides in US crop production. *Weed Technology* 21, 559-566
- Macé K., Morlon P., Munier-Jolain N., Quéré L. (2007) Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agricultural Systems* 93, 115-142
- Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L., Colbach N. (2015) Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators* 48, 157-170
- Milberg P., Hallgren E. (2004) Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research* 86, 199-209
- Munier-Jolain N. M., Guyot S. H. M., Colbach N. (2013) A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies. Model structure and evaluation. *Ecological Modelling* 250, 101-110
- Munier-Jolain N. M., Collard A., Busset H., Guyot S. H. M., Colbach N. (2014) Investigating and modelling the morphological plasticity of weeds in multi-specific canopies. *Field Crops Research* 155, 90-98
- O'Donovan J., Blackshaw R., Harker K., Clayton G., Maurice D. (2005) Field evaluation of regression equations to estimate crop yield losses due to weeds. *Canadian Journal of Plant Science* 85, 955-962
- Oerke E.-C. (2006) Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144, 31-43
- Quinio M., De Waele M., Dessaint F., Biju-Duval L., Buthiot M., Cadet E., Bybee-Finley A. K., Guillemin J.-P., Cordeau S. (2017) Separating the confounding effects of farming practices on weeds and winter wheat production using path modelling. *European Journal of Agronomy* 82, Part A, 134-143
- Soltani N., Dille J. A., Burke I. C., Everman W. J., VanGessel M. J., Davis V. M., Sikkema P. H. (2016) Potential corn yield losses from weeds in North America. *Weed Technology* 30, 979-984
- Song J.-S., Kim J.-W., Im J.-H., Lee K.-J., Lee B.-W., Kim D.-S. (2017) The Effects of Single- and Multiple-Weed Interference on Soybean Yield in the Far-Eastern Region of Russia. *Weed Science* 65, 371-380
- Swinton S. M., Buhler D. D., Forcella F., Gunsolus J. L., King R. P. (1994) Estimation of crop yield loss due to interference by multiple weed species. *Weed Science* 42, 103-109
- Wilson R. S., Tucker M. A., Hooker N. H., LeJeune J. T., Doohan D. (2008) Perceptions and beliefs about weed management: perspectives of Ohio grain and produce farmers. *Weed Technology* 22, 339-350